

(43) 国際公開日
2017 年 4 月 6 日(06.04.2017)



(10) 国際公開番号

WO 2017/056808 A1

(51) 国際特許分類:
G01R 15/24 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2016/074977

(22) 国際出願日: 2016 年 8 月 26 日(26.08.2016)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2015-191541 2015 年 9 月 29 日(29.09.2015) JP

(71) 出願人: 国立大学法人京都大学(KYOTO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 Kyoto (JP). 株式会社 Kyoto Future Medical Instruments (CORPORATION KYOTO FUTURE MEDICAL INSTRUMENTS) [JP/JP]; 〒1050003 東京都港区西新橋 2 丁目 1 3 番 1 4 号 パーク虎ノ門ビル Tokyo (JP).

(72) 発明者: 上野 智弘(UENO, Tomohiro); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 浦山 慎一(URAYAMA, Shin-ichi); 〒6068501 京都府京都市左

京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 福山 秀直 (FUKUYAMA, Hidenao); 〒1050003 東京都港区西新橋2丁目13番14号 パーク虎ノ門ビル 株式会社 Kyotofuture Medical Instruments内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人深見特許事務所 (FUKAMI PATENT OFFICE, P.C.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島二丁目2番7号 中之島セントラルタワー Osaka (JP).

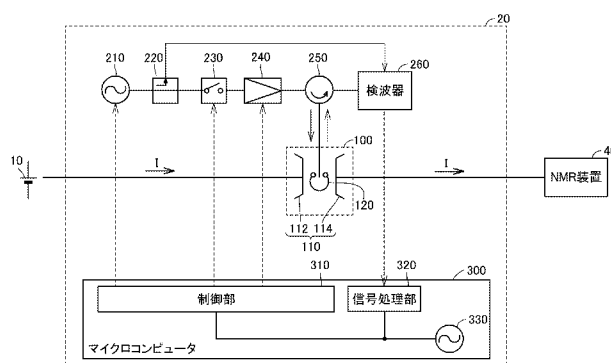
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: CURRENT MEASUREMENT DEVICE AND MAGNETIC RESONANCE MEASUREMENT SYSTEM PROVIDED WITH SAME

(54) 発明の名称：電流測定装置およびそれを備えた磁気共鳴測定システム

FIG. 7



40 NMR device
260 Detector
300 Microcomputer
310 Control unit
320 Signal processing device

(57) Abstract: A current measurement device (20) is provided with a resonator (120), coil (110), oscillator (210), detector (260), and signal processing unit (320). A paramagnetic reference substance (122) is provided inside the resonator (120). The coil (110) generates a static magnetic field as a result of the flow of current from a DC power supply (10) and is configured so as to be capable of applying the static magnetic field to the oscillator (120). The detector (260) detects a resonance signal output from the resonator (120) as a result of the electron spin resonance of the reference substance (122) when the static magnetic field generated by the coil (110) is applied to the resonator (120) and electromagnetic waves from the oscillator (210) are irradiated onto the resonator (120). The signal processing unit (320) uses a map indicating the correspondence relationship between the resonance frequency of the reference substance (122) and the current flowing through the coil (110) to calculate the current flowing through the coil (110) from the resonance frequency of the reference substance (122) calculated on the basis of the resonance signal.

(57) 要約:

〔続葉有〕

WO 2017/056808 A1



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

電流測定装置 (20) は、共振器 (120) と、コイル (110) と、発振器 (210) と、検波器 (260) と、信号処理部 (320) とを備える。共振器 (120) の内部には、常磁性を示す標準物質 (122) が設けられている。コイル (110) は、直流電源 (10) からの電流が流れることによって静磁場を発生し、その静磁場を共振器 (120) に印加可能に構成される。検波器 (260) は、コイル (110) により発生した静磁場が共振器 (120) に印加され、かつ、発振器 (210) からの電磁波が共振器 (120) に照射された場合に、標準物質 (122) の電子スピン共鳴により共振器 (120) から出力される共鳴信号を検出する。信号処理部 (320) は、共鳴信号に基づいて算出された標準物質 (122) の共鳴周波数から、標準物質 (122) の共鳴周波数とコイル (110) を流れる電流との対応関係を示すマップを用いて、コイル (110) を流れる電流を算出する。

明 細 書

発明の名称：

電流測定装置およびそれを備えた磁気共鳴測定システム

技術分野

[0001] 本発明は、電流測定装置およびそれを備えた磁気共鳴測定システムに関する。

背景技術

[0002] 近年、研究開発あるいは臨床診断の分野において、磁気共鳴測定システムが広く用いられている。磁気共鳴測定システムの例としては、NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 測定システムまたはMRI (Magnetic Resonance Imaging) 測定システム等が挙げられる。磁気共鳴測定システムでは、試料に印加するための強磁場を発生するために、一般に数百A（アンペア）程度の励磁電流が直流電源から電磁石へと供給される。

先行技術文献

非特許文献

- [0003] 非特許文献1：J. Krzystek et al, "DDPH as a Standard for High-Field EPR", Journal of Magnetic Resonance 125, 207-211(1997).
非特許文献2：Robert Diehl et al, "The Electromagnetic Modes of a Helical Resonator", Review of Scientific Instruments 67(11), November 1996.
非特許文献3：R. deCarvalho et al, "Buffer-gas Loaded Magnetic Traps for Atoms and Molecules: A Primer", The European Physical Journal D 7, 289-309(1999).
非特許文献4：D.M. Ginsberg and M.J. Melchener, "Optimum Geometry of Saddle Shaped Coils for Generating a Uniform Magnetic Field", The Review of Scientific Instruments 47(1), 122-123, January 1970.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0004] たとえば磁気共鳴測定システムにおいて、励磁電流を安定化することができれば、時間的な揺らぎが小さい直流磁場（静磁場）を発生することができる。静磁場の揺らぎが小さいほど、最終的に得られる測定結果の精度が向上し得る。つまり、励磁電流の安定度が高いほど静磁場の揺らぎが小さくなり、それによりNMRスペクトルの精度を高めたり、MRI画像の精細さを高めたりすることができる。
- [0005] 上記の事情は一例に過ぎず、直流電源から供給される電流を安定化するための技術に対する要望は様々な技術分野において存在する。そのような技術を実現するためには、電流を高精度に測定する技術が求められる。
- [0006] 本開示は上記課題を解決するためになされたものであり、その目的は、電流を高精度に測定可能な技術を提供することである。

課題を解決するための手段

- [0007] 本開示のある局面に従う電流測定装置は、直流電源から負荷へと供給される電流を測定する。電流測定装置は、共振器と、コイルと、光源と、検出器と、信号処理部とを、上記負荷とは異なる電流測定装置の内部に備える。共振器の内部には、常磁性を示す標準物質が設けられる。コイルは、直流電源からの電流が流れることによって磁場を発生し、発生した磁場を共振器に印加可能に構成される。光源は、電磁波を共振器に照射可能に構成される。検出器は、コイルにより発生した磁場が共振器に印加され、かつ、光源からの電磁波が共振器に照射された場合に、標準物質の電子スピン共鳴または電子常磁性共鳴により共振器から出力される電磁波を検出する。信号処理部は、検出器からの信号に基づいて、標準物質の共鳴周波数を算出する。信号処理部は、検出器からの信号に基づいて算出された共鳴周波数から、標準物質の共鳴周波数とコイルを流れる電流との対応関係を用いて、コイルを流れる電流を算出する。
- [0008] 好ましくは、コイルの巻数は、1～3である。

好ましくは、コイルは、サドルコイルであって、第1および第2の湾曲部と、第1および第2の連結部とを含む。第1および第2の湾曲部の各々は、共通の軸周りに湾曲するように形成される。第1および第2の連結部の各々は、上記軸の延在方向に沿って伸び、第1の湾曲部と第2の湾曲部とを連結するように形成される。第1および第2の連結部は、上記軸に関して互いに対向するように配置される。共振器は、上記軸上に設けられる。

[0009] 好ましくは、コイルは、略同一形状を有する第1および第2の円形コイルが共通の中心軸を持つように配置されたヘルムホルツコイルである。共振器は、第1および第2の円形コイルの各々の中心から等距離の位置に設けられる。

[0010] 好ましくは、コイルは、共振器に印加される磁場が地磁気に対して略直交する方向になるように設けられる。

[0011] 好ましくは、電流測定装置は、磁気シールドをさらに備える。磁気シールドは、コイルを覆い、地磁気を遮蔽する。

[0012] 好ましくは、コイルは、高温超電導材料により形成される。電流測定装置は、コイルを冷却するための冷却液を保持可能に構成された断熱容器をさらに備える。

[0013] 好ましくは、電流測定装置は、断熱容器の内部に設けられたクライオポンプをさらに備える。クライオポンプは、自身の温度が低下するに従って気体の捕捉量が増加するように構成される。

[0014] 好ましくは、標準物質は、D P P H (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) である。

本開示の他の局面に従う磁気共鳴測定システムは、上記直流電源と、上記電流測定装置と、磁気共鳴装置とを備える。磁気共鳴装置は、直流電源から供給される電流を用いて、試料に印加するための磁場を発生する他のコイルを上記負荷として含む。

発明の効果

[0015] 本開示によれば、電流を高精度に測定することができる。

図面の簡単な説明

- [0016] [図1]電子スピン共鳴の原理を説明するための図である。
- [図2]自由誘導減衰法を説明するための図である。
- [図3]スピンエコー法を説明するための図である。
- [図4]実施の形態1における電流測定メカニズムを説明するための図である。
- [図5]共鳴周波数から電流を算出する手法の一例を説明するための図である。
- [図6]実施の形態1に係る電流測定装置を搭載したNMR測定システムの構成を概略的に示すブロック図である。
- [図7]電流測定装置の構成をより詳細に示すブロック図である。
- [図8]測定部の外観斜視図である。
- [図9]図8に示すI-X-I-X線に沿う測定部の断面図である。
- [図10]実施の形態1に係る測定方法を説明するためのフローチャートである。
- [図11]実施の形態2におけるコイル構成を説明するための図である。
- [図12]実施の形態2に係る電流測定装置の測定部の構成を説明するための断面図である。

発明を実施するための形態

- [0017] 以下、本開示の実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰り返さない。
- [0018] 以下に説明する実施の形態においては、電子スピン共鳴（ESR : Electron Spin Resonance）または電子常磁性共鳴（EPR : Electron Paramagnetic Resonance）を用いて直流電流の大きさが測定される。
- [0019] 本開示の実施の形態において、「標準物質」との用語は、ESRスペクトル（またはEPRスペクトル）と、磁気パラメータと等の各種特性が既知の物質を意味する。「標準物質」には、ある標準物質を用いて校正された他の物質を含み得る。つまり、ある標準物質の特性を基準にして他の物質の対応する特性を規定した場合には、その「他の物質」も「標準物質」に含み得る。

。

[0020] <電子スピン共鳴法の原理>

電子スピン共鳴および電子常磁性共鳴の原理は同等であるため、以下、電子スピン共鳴法の原理について代表的に説明する。

[0021] 図1は、電子スピン共鳴法の原理を説明するための図である。図1(a)を参照して、不対電子を持ち常磁性を示す物質（フリーラジカル）に静磁場Hが印加されると、不対電子のスピンのエネルギー状態は2つの準位に分裂する。この分裂はゼーマン分裂とも称される。2つの準位のうちエネルギーの高い準位にある電子スピン（ α スピン）と、エネルギーの低い準位にある電子スピン（ β スピン）とのエネルギー差 ΔE は、下記式(1)で表される。式(1)において、 g は「 g 値」とも呼ばれ、各フリーラジカルに固有の定数である。 β は「ボア磁子」とも呼ばれ、1つの不対電子がもつ磁気モーメントを示す定数である。

[0022]
$$\Delta E = g \beta H \quad \dots (1)$$

図1(b)において、横軸は静磁場Hを表し、縦軸はエネルギーを表す。図1(b)には、式(1)から分かるように、ゼーマン分裂によるエネルギー差 ΔE が静磁場Hに比例することが示されている。ここでエネルギー差 ΔE に等しいエネルギーを有する電磁波がフリーラジカルに照射されると、 β スピンをもつ電子は、電磁波を吸収して α スピンのエネルギー準位へと遷移する。すなわち、下記式(2)に示すように、電磁波のエネルギーがエネルギー差 ΔE に等しい場合に電磁波の吸収による共鳴現象が起こる。式(2)において、プランク定数を h で表し、電磁波の周波数を ν で表す。

[0023]
$$h \nu = g \beta H \quad \dots (2)$$

電子スピン共鳴法では、式(2)に示す共鳴条件が成立すると、フリーラジカルによるエネルギーの吸収を示す信号（共鳴信号）が観測される。この共鳴信号からESRスペクトルを取得し、さらに取得されたESRスペクトルを解析することによって、そのフリーラジカルについて、電子スピンの状態あるいは不対電子の密度等の各種特性（たとえば g 値および超微細結合定

数に代表される磁気パラメータ)を求めることができる。

[0024] 共鳴条件を成立させるためには、電磁波の周波数 ν （言い換えるとエネルギー $h\nu$ ）を一定にしつつ静磁場 H を変化させる手法と、静磁場 H を一定にしつつ電磁波の周波数 ν を変化させる手法とが考えられる。前者の手法は、連続波（CW: Continuous Wave）－ESR法により実現される。CW－ESR法では一般に、一定の周波数を有する電磁波が連続波として試料に照射された状態において、電磁石の励磁電流を掃引することによって静磁場を掃引する。

[0025] 前者の手法に関し、静磁場の掃引は容易に実現可能である。これに対し、後者の手法に関し、一般に、共振器等を含む測定装置は周波数依存性を有する。よって、共鳴信号の周波数依存性を補正しなければならないため、電磁波の周波数掃引は敬遠される傾向にある。

[0026] そこで、電磁波の周波数掃引に代えて、パルスESR法を用いることができる。パルスESR法では、一定の静磁場が試料に印加された状態において、パルス状の電磁波（以下「パルス波」と略す）が試料に照射される。実施の形態1では、パルスESR法のより詳細な区分である、自由誘導減衰（FID: Free Induction Decay）法およびスピンエコー法のいずれかが用いられる。

[0027] 図2は、FID法を説明するための図である。図2（a）を参照して、FID法では、パルス波P1が静磁場中に設けられた試料に照射される。図2（b）は、パルス波P1を拡大表示したものである。図2（b）に示すように、パルス波P1は単一の周波数 ν_p を有する。パルス波P1のパルス幅は Δt である。

[0028] 図2（c）は、図2（b）に時間領域表示されたパルス波P1をフーリエ変換することによって周波数領域にて表示したものである。図2（c）には、パルス波P1のスペクトルが、周波数 ν_p を中心として、不確定性原理による拡がり（スペクトル幅） $\Delta \nu$ を持つことが示されている。スペクトル幅 $\Delta \nu$ はパルス幅 Δt の逆数（ $1/\Delta t$ ）にほぼ等しいので、パルス幅 Δt を

制御することによってスペクトル幅 $\Delta\nu$ （言い換えれば周波数帯域）を調整することができる。このように、パルスESR法では、パルス波P 1, P 2が単一の周波数 ν_p を有するものであっても、パルス幅 Δt を適切に設定することにより周波数帯域を調整して共鳴条件を成立させることができる。

[0029] 共鳴条件が成立している場合、電子は高エネルギー準位へと遷移し、パルス波P 1の照射直後から応答信号R 1が観測される。試料内部での応答信号R 1の位相の乱れにより、応答信号R 1の信号強度は時間とともに減衰する。応答信号R 1の継続時間および強度は、試料の磁気パラメータに依存する。応答信号R 1をフーリエ変換することにより、ESRスペクトルが取得される。

[0030] 図3は、スピンエコー法を説明するための図である。図3を参照して、パルスESR法では、パルス波P 1, P 2が静磁場中に設けられた試料に時間間隔 τ で照射される。共鳴条件が成立している場合、スピンエコー法においても、パルス波P 1の照射直後にFIDによる応答信号R 1が生じる。さらに、スピンエコー法では、パルス波P 2の照射から時間 τ 経過後に応答信号R 2が観測される。応答信号R 2は、応答信号R 1と、応答信号R 1の最大値を通る中心軸について応答信号R 1を反転させたものとを重ね合わせたような山型形状を有する。応答信号R 2の強度は、試料の磁気パラメータに応じて変調する。応答信号R 1, R 2をフーリエ変換することにより、ESRスペクトルが取得される。

[0031] FID法の利点は、パルス波P 1の強度が比較的小さい場合にも使用可能な点にある。特に、一般的な高周波（たとえば、後述するように共鳴周波数 ν が数GHzから数百GHzまでの範囲）のESRでは強度の大きいパルス生成することが難しいため、FID法は有用である。一方、スピンエコー法は、信号の位相情報を確定できるため、フーリエ変換後の応答信号R 1, R 2がシャープになる点に利点を有する。

[0032] [実施の形態1]

<電流測定メカニズム>

実施の形態 1 に係る電流測定装置においては、以上で説明したパルス ESR 法を用いて電流測定が行なわれる。

[0033] 図 4 は、実施の形態 1 における電流測定メカニズムを説明するための図である。図 4 を参照して、測定システムは、直流電源 10 と、電流測定装置 20 と、負荷 30 とを備える。

[0034] 直流電源 10 は、電流 I を負荷 30 に供給する。直流電源 10 は、典型的には安定度の高い直流電流を供給可能に構成された安定化電源であるが、これに限定されるものではなく、たとえば蓄電装置（バッテリー等）であってもよい。負荷 30 は、直流電源 10 から供給された電流 I を消費する機器であれば特に限定されない。

[0035] 電流測定装置 20 は、直流電源 10 と負荷 30 との間に電氣的に接続される。電流測定装置 20 は、直流電源 10 から負荷 30 へと供給される電流 I を測定するための測定部 100 を含む。測定部 100 にはコイル 110 が設けられている。

[0036] 実施の形態 1 において、コイル 110 はサドルコイルである。すなわち、コイル 110 は、2 つのサドル（鞍）形状のコイルの各々の盛り上がった部分（前橋または後橋）を互いに外側に配置することで、コイル 110 全体としては円筒形状になるように構成されている。

[0037] より具体的には、コイル 110 は、湾曲部 112, 114 と、連結部 116, 118 とを含む。湾曲部 112（第 1 の湾曲部）と湾曲部 114（第 2 の湾曲部）とは、各々が共通の軸 $A \times$ の周りに円弧状に湾曲するように形成される。連結部 116（第 1 の湾曲部）および連結部 118（第 2 の湾曲部）の各々は、軸 $A \times$ の延在方向に沿って延び、湾曲部 112 と湾曲部 114 とを連結するように形成される。連結部 116 と連結部 118 とは、軸 $A \times$ に関して互に対向するように配置される。

[0038] 電流 I が励磁電流としてコイル 110 を流れると、静磁場 H が発生する。静磁場 H の方向は、軸 $A \times$ に略垂直な方向である。共振器 120 は、湾曲部 112 と湾曲部 114 との間において、軸 $A \times$ 上に設けられる。

- [0039] 一般的なESR法において、共振器の内部には、ESRスペクトルおよび磁気パラメータ等の特性が未知の試料が用いられる。その試料について、ESRスペクトルを取得し、取得されたESRスペクトルを解析することによって、磁気パラメータ等の特性が求められる。
- [0040] 一例として、電子スピン共鳴が起こる周波数（共鳴周波数） ν_0 をESRスペクトルから求めることができる。一方、コイルを流れる励磁電流は測定可能であるため、励磁電流と静磁場との対応関係を予め取得しておけば、励磁電流から、電子スピン共鳴が起こるときの静磁場 H_0 を算出することができる。よって、たとえば共鳴周波数 ν_0 および静磁場 H_0 を上記式（2）に代入することにより、その試料の g 値を求めることができる。
- [0041] ここで、本発明者らは、コイル110を流れる電流 I と、その電流 I により発生する静磁場 H （ H_0 ）と、その静磁場 H が印加されることにより電子スピン共鳴が起こる際の共鳴周波数 ν_0 との間に対応関係が存在する点に着目した。この対応関係を予め規定しておくことにより、静磁場 H_0 および共鳴周波数 ν_0 から、測定対象のパラメータである電流 I を算出することができる。
- [0042] より詳細に説明すると、電流 I と静磁場 H との対応関係は高精度に計算可能であるので、電流測定装置20に含まれる各構成要素の加工精度または位置ずれ等による誤差を考慮して校正をさらに行なうことで、電流 I と静磁場 H との対応関係を予め取得しておくことができる。そのため、静磁場 H_0 と共鳴周波数 ν_0 との対応関係を取得すれば、静磁場 H_0 および共鳴周波数 ν_0 から電流 I を算出することが可能になる。
- [0043] そこで、実施の形態1において、共振器120の内部には、ESRスペクトルおよび磁気パラメータ（たとえば g 値）等の各種特性が既知の標準物質122が設けられる。電子スピン共鳴が起こるときの共鳴周波数 ν_0 は測定可能である。したがって、式（2）を用いることにより、共鳴周波数 ν_0 と標準物質122の g 値とから、電子スピン共鳴が起こるときの静磁場 H_0 が算出される。すなわち、標準物質122を用いることにより、静磁場 H_0 と共鳴周波数 ν_0 との対応関係を取得することができる。

[0044] このように標準物質 122 を用いると、電流 I と、静磁場 H (H_0) と、共鳴周波数 ν_0 との間の対応関係を予め規定することによって、共鳴周波数 ν_0 から電流 I を算出することが可能になる。なお、装置構成（具体的にはコイル 110 の構成、およびコイル 110 と共振器 120 との位置関係）が変更されない限り、電流 I と静磁場 H との対応関係は固定される。よって、より簡略的に、電流 I と共鳴周波数 ν_0 との対応関係を規定することができる。

[0045] 図 5 は、共鳴周波数 ν_0 から電流 I_0 を算出する手法の一例を説明するための図である。図 5 において、横軸は共鳴周波数 ν を表し、縦軸は電流 I を表す。図 5 の直線 L に示されるように、電流 I と共鳴周波数 ν_0 との対応関係は、基本的には原点を通る 1 次関数である。このような対応関係を、たとえば関数またはマップとして電流測定装置 20 が予め有することによって、共鳴周波数 ν_0 から電流 I_0 を算出することができる。

[0046] <システム構成>

以下では、実施の形態 1 に係る電流測定装置 20 が NMR 測定システムに適用される構成を例に説明する。ただし、電流測定装置 20 が適用可能な磁気共鳴システムは NMR 測定システムに限定されず、たとえば MR 1 測定システムであってもよい。また、実施の形態 1 に係る電流測定装置の用途は、電流を高精度に測定する要望が存在するものであれば磁気共鳴測定システムに限定されない。

[0047] 図 6 は、実施の形態 1 に係る電流測定装置 20 を搭載した NMR 測定システムの構成を概略的に示すブロック図である。図 6 を参照して、NMR 測定システム 1 は、直流電源 10 と、電流測定装置 20 と、NMR 装置 40 とを備える。NMR 装置 40 は、負荷 30（図 4 参照）としての電磁石 41 と、分光器 42 と、信号処理装置 43 とを含む。

[0048] 直流電源 10 は、電流 I を NMR 装置 40 に供給する。電流 I の大きさは、たとえば 100 A 以上かつ 500 A 以下の範囲であり、典型的には 300 A である。

[0049] 電磁石 41 は、超電導コイルを含んで構成され、直流電源 10 から供給さ

れた電流 I により強磁場を発生する。発生した強磁場は図示しない試料に印加される。電磁石 4 1 には超伝導材料が用いられているものの、わずかな電流損失が生じるため、強磁場は時間の経過とともに減衰し得る。よって、強磁場の減衰を抑制するために、直流電源 1 0 から電磁石 4 1 へと電流 I が常

に供給される。

[0050] 分光器 4 2 は、試料から発せられた光を分光し、その分光結果を示す信号を信号処理装置 4 3 に出力する。信号処理装置 4 3 は、分光器 4 2 から受けた信号に対して各種信号処理を行なうことにより、NMR スペクトルを取得する。さらに、信号処理装置 4 3 は、NMR スペクトルを解析することにより、試料の特性を算出する。

[0051] 電流測定装置 2 0 は、直流電源 1 0 と電磁石 4 1 との間に接続され、直流電源 1 0 から電磁石 4 1 に供給される電流 I を測定する。電流測定装置 2 0 の構成について、図 7 ～図 9 を用いて詳細に説明する。

[0052] 図 7 は、電流測定装置 2 0 の構成をより詳細に示すブロック図である。図 6 および図 7 を参照して、電流測定装置 2 0 は、発振器 2 1 0 と、結合器 2 2 0 と、ゲート 2 3 0 と、増幅器 2 4 0 と、サーキュレータ 2 5 0 と、検波器 2 6 0 と、測定部 1 0 0 と、マイクロコンピュータ 3 0 0 とを備える。測定部 1 0 0 は、図 4 にて説明したように、コイル 1 1 0 と、共振器 1 2 0 とを含む。マイクロコンピュータ 3 0 0 は、制御部 3 1 0 と、信号処理部 3 2 0 と、周波数発生部 3 3 0 とを含む。図 7 に示すように、共振器 1 2 0 と、コイル 1 1 0 と、発振器 2 1 0 と、検波器 2 6 0 と、マイクロコンピュータ 3 0 0 とは、NMR 装置 4 0 とは異なる電流測定装置 2 0 の内部に設けられる。

[0053] 発振器（光源）2 1 0 は、制御部 3 1 0 からの制御信号に応答して、所定の周波数の電磁波を発生し結合器 2 2 0 へと出力する。結合器 2 2 0 は、発振器 2 1 0 からの電磁波の一部をゲート 2 3 0 に出力する一方で、電磁波の他の一部を参照信号として検波器 2 6 0 に出力する。

[0054] ゲート 2 3 0 および増幅器 2 4 0 は、所望のパルス幅およびパルス強度（

波高)を持つパルス波を生成する。より具体的には、ゲート230は、制御部310からのゲート信号に応答して、電磁波を通過させたり遮断したりする。増幅器240は、制御部310からの制御信号に応答して、ゲート230を通過した電磁波を増幅する。

[0055] サーキュレータ250は、ゲート230および増幅器240により生成されたパルス波を共振器120に出力する。なお、サーキュレータ250は、パルス波が増幅器240から検波器260へと直接的には伝搬しないように構成される。

[0056] 図4にて説明したように、コイル110は、直流電源10からNMR装置40へと供給される電流Iを励磁電流として静磁場Hを発生する。また、共振器120内部には標準物質122(図4参照)が収容される。静磁場Hが共振器120に印加され、かつパルス波が共振器120に照射されて共鳴条件が成立した場合、電子スピン共鳴による変調を受けた共鳴信号(図2(a)または図3に示す応答信号R1, R2)が生じる。この共鳴信号は、サーキュレータ250を介して検波器260へと出力される。

[0057] 検波器(検出器)260は、結合器220によって分岐された電磁波を参照信号として共鳴信号を検波し、その検波結果を示す信号を信号処理部320に出力する。

[0058] マイクロコンピュータ300は、いずれも図示しないが、CPU(Central Processing Unit)と、メモリと、入出力バッファ等を含んで構成される。

[0059] 制御部310は、電流測定装置20の各構成要素を制御する。より具体的には、制御部310は、周波数発生部330からの周波数信号に基づいて、発振器210への制御信号、ゲート230へのゲート信号、および増幅器240への制御信号を出力する。

[0060] 信号処理部320は、検波器260からのアナログ信号をデジタル信号に変換する。また、信号処理部320は、メモリに格納されたマップまたはプログラムに基づいて、上記デジタル信号に対してフーリエ変換などの各種信

号処理を行なってE S Rスペクトルを取得し、取得されたE S Rスペクトルから共鳴周波数 ν_0 を算出する。そして、信号処理部320は、図5にて説明したように、標準物質122の共鳴周波数 ν とコイル110を流れる電流 I との対応関係を用いて、共鳴周波数 ν_0 から電流 I_0 を算出する。

[0061] 周波数発生部330は、制御部310および信号処理部320の動作の基準となる周波数信号を発生する。制御部310および信号処理部320の動作精度が高くなるように、周波数発生部330としては、周波数精度ができるだけ高いもの（たとえば $\pm 50 \text{ ppb}$ （10のマイナス9乗））よりも高いものを用いることが望ましい。

[0062] <測定部の構成>

図8は、測定部100の外観斜視図である。図7および図8を参照して、 x y 平面方向は水平方向を表す。 x 方向と y 方向とは互いに直交する。 z 方向は鉛直方向を表す。重力の向きは z 方向下方である。

[0063] 測定部100は、たとえば円筒形の筐体101を有する。筐体101の上面101Uには、ポート102～105と、方位磁石106と、方位マーク107とが設けられている。筐体101は、その下面101Lを免震台（図示せず）等に固定可能に構成される。

[0064] ポート102は、直流電源10から測定部100への電流 I の入力端子である。ポート103は、測定部100からNMR装置40への電流 I の出力端子である。電流 I は、たとえば数百A程度の大電流であるため、上記のように入力端子と出力端子とを別々に設けることが望ましい。

[0065] ポート104は、サーキュレータ250から共振器120（いずれも図7参照）へのパルス波の入力、および、共振器120からサーキュレータ250への共鳴信号の出力を行なうための入出力端子である。サーキュレータ250を設けることにより、入力端子と出力端子とを共通化できるので、測定部100の構造をシンプルにすることができる。

[0066] ポート105は、後述する冷却液150を注入（または補充）したり、気化した冷却液150を逃がしたりするための開口である。

[0067] 方位磁石 106 は、磁石の作用を用いて北の方角を指し示す。方位マーク 107 としては、たとえば図 8 に示すような北の方角を示す記号が用いることができる。方位磁石 106 が指し示す北の方角（磁北）に、方位マーク 107 が示す北の方角を一致させることで、地磁気に対する測定部 100 の設置方向を決めることができる。方位磁石 106 および方位マーク 107 の詳細については後述する。

[0068] なお、図 7 では、電流測定装置 20 がサーキュレータ 250 を備える構成を例に説明したが、サーキュレータ 250 は省略してもよい。この場合には、信号の伝達経路を、増幅器 240 から測定部 100 への伝達経路と、測定部 100 から検波器 260 への伝達経路とに分離しなければならない。つまり、ポート 104 に代えて 2 つのポートを設けることが必要になるので、図 8 に示す構造と比べて、測定部 100 の構造が複雑化し得る。その一方で、共振器 120 への信号の入力および共振器 120 からの信号の出力を調整するための条件が増えるので、共鳴信号の最適化を行ないやすくなる。たとえば、入力の結合状態（カップリング）を高めて強度の高いパルス波（P1, P2）を送る一方で、出力の結合状態は低くして共鳴の Q 値を上げるなどの調整が可能になる。

[0069] 図 9 は、図 8 に示す I X - I X 線に沿う測定部 100 の断面図である。図 7 ~ 図 9 を参照して、測定部 100 は、試料管 130 と、断熱容器 140 と、冷却液 150 と、磁気シールド 160 とを備える。試料管 130 は、コイル 110（図 2 の湾曲部 112, 114 および連結部 116, 118 参照）ならびに共振器 120 に加えて、ホルダ 132, 134 と、クライオポンプ 136 とをさらに含む。

[0070] コイル 110 は、たとえば高温超電導材料により形成される。高温超電導材料としては公知の材料を用いることができる。実施の形態 1 では、超電導の転移温度が液体窒素の沸点よりも低い材料が用いられる。

[0071] 共振器 120 は、たとえばヘリカルレゾネータである。共振器 120 の内部には、DPPH が標準物質 122 として設けられる。ただし、標準物質 1

22の種類はこれに限定されるものではなく、たとえばBDPA (1,3-bisdi phenylene-2-phenylally) であってもよい。このように標準物質122としては、DPFHまたはBDPAのような安定なフリーラジカルを用いることが好ましい。フリーラジカルの共鳴線の線幅は多くの物質の共鳴線の線幅よりも狭いので、図5にて説明したような対応関係を高精度に取得可能であるためである。

[0072] ホルダ132はコイル110を保持する。ホルダ134は、共振器120と、サーキュレータ250からポート104を介して入力されるパルス波の伝送線路と、共振器120からポート104を介して出力される共鳴信号の伝送線路とを保持する。ホルダ132、134の各々は、たとえば強化樹脂により形成される。ホルダ132は、ホルダ134を挿入可能に構成される。ホルダ134がホルダ132に挿入された状態では、ホルダ132、134は互いに密着し、ホルダ132とホルダ134との間にはわずかな空間（隙間）しか生じない。

[0073] クライオポンプ136は、ホルダ132とホルダ134との間の隙間に設けられる。クライオポンプ136は、クライオポンプ136自身の温度が低下すると、試料管130内部の気体分子を極低温面（図示せず）に凝縮または吸着させることによって捕捉する。

[0074] 断熱容器140は、試料管130を収容するとともに、試料管130を冷却するための冷却液150を保持可能に構成される。断熱容器140は真空断熱層（図示せず）を有するため、断熱容器140外部から冷却液150への熱伝導が抑制される。冷却液150の種類としては、コイル110に用いられる高温超電導材料の転移温度に応じて適宜選択することができるが、実施の形態1では液体窒素が用いられる。

[0075] 磁気シールド160は、筐体101の外壁を覆い（言い換えればコイル110を覆い）、地磁気を遮蔽する。磁気シールド160の材料としては透磁率の高い材料が好ましい。そのような材料としては、パーマロイまたはパーメンジュール等が挙げられる。

[0076] 以上のような構成を有する測定部 100 において、電流 I の測定精度を向上させるための各構成要素の役割について、より詳細に説明する。

[0077] <試料管の冷却>

まず、冷却液 150 を用いて試料管 130 を冷却する理由について説明する。その理由としては主に以下の 3 点が挙げられる。

[0078] 第 1 に、コイル 110 の超電導状態を実現するためである。これにより、コイル 110 におけるジュール熱の発生による温度変化を低減するとともに、コイル 110 を構成する原子または分子の熱運動に伴うノイズ（熱雑音）を低減することができる。その結果、電流 I の測定精度の悪化を抑制することができる。

[0079] 第 2 に、共振器 120 の温度変化に伴い共振器 120 の熱膨張または熱収縮が起こると、共振器 120 の Q 値、共鳴周波数、および結合定数（カップリング）が変化するため、共振器 120 から出力される共鳴信号の波形も変化し得る。その結果、その共鳴信号をフーリエ変換することによって取得される ESR スペクトルが温度依存性を示すようになり得る。よって、共振器 120 の温度を一定に維持することが望ましい。一般に、液体窒素等の冷却液を用いて装置温度を極低温の一定値に維持することは、技術的に確立されており、装置温度を室温付近にて一定値に維持するよりもやさしい。したがって、実施の形態 1 では冷却液 150 を用いて共振器 120 の熱膨張または熱収縮を抑制することにより、室温変化に伴う電流 I の測定値の変動を低減することができる。また、様々な室温環境下において、季節にかかわらず同一温度条件で測定を行なうことができる。

[0080] 第 3 に、電子スピンのうち α スピンと β スピン（図 1 参照）との比率（占有率）はボルツマン分布則により定まるところ、共振器 120 の冷却により標準物質 122 の温度が低くなるに従って、 β スピンの占有率が相対的に高くなる。つまり、 β スピンのエネルギー準位から α スピンのエネルギー準位へと遷移可能な電子スピン数が大きくなるので、共鳴信号の強度を大きくすることができる。

[0081] <クライオポンプによる真空生成>

次に、クライオポンプ 136 の機能について、より詳細に説明する。断熱容器 140 に冷却液 150 が保持されておらず試料管 130 が冷却されていない状態（図示せず）では、クライオポンプ 136 は、試料管 130 内部における気体分子の存在を許容する。これは、冷却液 150 を用いて共振器 120 を冷却する際に、共振器 120 から冷却液 150 への熱伝導を生じさせるための媒質として気体分子が必要であるためである。一方で、断熱容器 140 に冷却液 150 が保持され試料管 130（およびクライオポンプ 136 自身）が冷却された状態では、クライオポンプ 136 は、気体分子を捕捉し、試料管 130 内部を真空状態に保持する。

[0082] なお、上述のように、ホルダ 134 がホルダ 132 に挿入された状態において、ホルダ 132 とホルダ 134 との間にはわずかな隙間しか生じない。このような構造は、クライオポンプ 136 によって生成された真空状態を維持するのに寄与する。また、ポート 102～104 の各々は、電磁波を通過させる一方で、空気の通過は許容せず真空状態を維持するように構成されている。

[0083] 共振器 120 内部に冷却液 150 が存在する場合、液体と気体との密度差あるいは気体の位置に応じて共鳴状態が変化し、ノイズの要因となり得る。また、共振器 120 内部に空気が含まれた状態では、空気中の水分子または酸素分子からフリーラジカルが生じ、共鳴信号におけるバックグラウンドノイズとなり得る。クライオポンプ 136 を用いて共振器 120 内部を真空状態にすることにより、このような要因を排除することができる。

[0084] さらに、共振器 120 内部が真空状態の場合とそうでない場合とでは電磁波（パルス波）の波長が異なる（波長短縮率が異なる）ので、共振周波数 ν の測定誤差の要因となり得る。波長短縮率に関しては特に水分子の影響が大きい。共振器 120 内部を真空状態にすることによって、波長短縮率に起因する誤差を抑制することができる。

[0085] また、冷却液 150 の沸騰による気泡が破裂する際に音波などの衝撃波が

生じ得る。試料管 130 内部を真空状態にすることにより衝撃波の媒質がなくなるので、衝撃波が伝わりにくくなる。つまり、冷却液 150 から共振器 120 へと伝わる衝撃および振動を緩和することができる。

[0086] <測定部の方角>

測定部 100 は、コイル 110 により発生する静磁場 H と地磁気 H_e とが略直交するように設置することが好ましい。このように測定部 100 を設置するための手法について、以下に詳細に説明する。

[0087] 北磁極および南磁極を除く地球上のあらゆる場所において、地磁気 H_e は、方位磁石によって示される北の方角（磁北）のベクトルと、鉛直方向のベクトルとで張られる平面内に存在する。この平面内において、地磁気 H_e が水平方向となす角は、測定部 100 の設置箇所の緯度によって異なり得る。地磁気 H_e が水平方向となす角は、たとえば沖縄では約 45° であり、北海道では約 60° である。さらに、地磁気 H_e は、上記平面内において、測定部 100 が設置された建物の構造材の影響を受ける可能性がある。

[0088] 図 9 において、鉛直方向は z 方向である。筐体 101 の上面 101U に設けられた方位磁石 106 によって示される磁北は、紙面に垂直な平面方向（ yz 平面方向）であるとする。地磁気 H_e が水平方向となす角は、電流測定装置 20 の設置箇所の緯度によって異なり得るものの、いずれの緯度においても yz 平面内である。よって、コイル 110 により発生する静磁場 H が紙面に平行な平面方向（ xz 平面方向、すなわち東または西方向）となるように電流測定装置 20 を設置すれば、緯度によらず静磁場 H と地磁気 H_e とを略直交させることができる。

[0089] 実施の形態 1 では、測定部 100 は、ユーザが測定部 100 を設置する際に、方位磁石 106 によって示される磁北に方位マーク 107 の方角を一致させることで、静磁場 H の方向が東または西の方角となるように構成されている。これにより、上記のような直交関係を容易に成立させることができる。また、建物の構造材の影響を考慮しなくてもよいので、測定部 100 の設置箇所における地磁気 H_e の詳細なデータを調査するための費用および時間

を節約することができる。なお、北磁極または南磁極では、コイル 110 による静磁場 H が水平方向になるように電流測定装置 20 を設置すれば、直交条件を成立させることができる。

[0090] <測定部の外形形状>

測定部 100 の外形形状について説明する（図 8 参照）。測定部 100 の外形形状としては様々な形状を採用することができるが、直方体形状を採用することが最も一般的と考えられる。しかしながら、直方体形状の場合、直方体の任意の面を底面として測定部 100 を設置することが可能であるため、設置の仕方によっては静磁場 H と地磁気 H_e とが互いに直交しない可能性がある。

[0091] 実施の形態 1 においては、図 8 にて説明したように、測定部 100 の外形形状として円筒形が採用される。これにより、測定部 100 を設置する際に、円筒形の側面を底面とすることはできなくなる。また、円筒形の上面 101U にはポート 102～105 が設けられている。したがって、ユーザが特に意識しなくとも、測定部 100 は円筒形の下面 101L が底面となるように設置されることになる。その結果、静磁場 H と地磁気 H_e との直交関係を確実に確保することができる。なお、静磁場 H と地磁気 H_e とを互いに直交させることによる効果については後述する。

[0092] また、測定部 100 の外形形状が直方体形状の場合、大気圧と断熱容器 140 の真空断熱層の圧力との圧力差によって、時間の経過に伴い測定部 100 が変形し得る。外形形状を円筒形にすることにより、そのような変形を生じにくくすることができる。

[0093] <コイル構成>

次に、コイル 110 の巻数について説明する。上記式（2）に示す共鳴条件が成立する場合、電磁波の共鳴周波数 ν と静磁場 H とは比例関係にあるため、静磁場 H が強くなるに従って共鳴周波数 ν も高くなる。一般的な ESR 法において用いられるコイルの巻数は、数千以上である。そのため、発生する静磁場も比較的強く、1 T（テスラ）程度（たとえば 0.1 T から 10 T

までの範囲)であることが多い。したがって、式(2)より、電磁波の共鳴周波数 ν は、数GHzから数百GHzまでの範囲である。

[0094] コイルの巻数が大きくなるにつれて、コイルのインダクタンスは大きくなる。実施の形態1において、コイル110のインダクタンスが過度に大きいと、コイル110を流れる電流 I が変動したとしても、静磁場 H がほとんど変化しない可能性がある。つまり、電流 I の微小な変動を測定することができなくなる可能性がある。したがって、電流 I の測定精度を向上させるためには、コイル110の巻数を小さくしてコイル110のインダクタンスをできるだけ小さくすることが望ましい。よって、実施の形態1では、1巻きから数巻き程度のコイル110を用いることが好ましく、1巻きから3巻きのコイル110を用いることがより好ましい。

[0095] このように、実施の形態1では、コイル110の巻数が一般的なESR法におけるコイルの巻数よりも少ないので、発生する静磁場 H も弱くなる。一例として、コイル110の巻数が1であり、かつ、コイル110の直径 ϕ が10cmであり、かつ、コイル110を流れる電流 I が300Aである場合、静磁場 H は約40G(ガウス)である(1T=10,000G)。すなわち、実施の形態1における静磁場 H は、一般的なESR法における静磁場と比べて2桁～3桁程度も弱い。そのため、電磁波の共鳴周波数 ν も低くなり、たとえば数十MHzから数百MHzまでの範囲となることが多い。たとえば、静磁場 H が約50Gであり、かつ標準物質122としてDPPHを用いる場合には、電磁波の共鳴周波数 ν は、たとえば100MHz～120MHz程度になる。以上のように、実施の形態1に係る電流測定方法は、共鳴周波数 ν が一般的なESR法における共鳴周波数よりも低い点において、「低周波ESR法」と呼ぶことができる。

[0096] <標準物質の選択>

続いて、標準物質122としてDPPHを用いることが好ましい理由について説明する。その理由としては主に以下の2点が挙げられる。

[0097] 第1に、実施の形態1に係る電流測定装置20においては、図5にて説明

したように、標準物質 122 の共鳴周波数 ν とコイル 110 を流れる電流 I との対応関係（関数またはマップ）を信号処理部 320 が予め有していることが必要である。DPPH は、ESR 法における標準物質の代表的な材料であるため、ESR スペクトルおよび磁気パラメータが詳細に調べられている。よって、上記対応関係を容易かつ精密に規定することができる。

[0098] 第 2 に、DPPH の g 因子には異方性がないので共鳴線が 1 つであり、さらに、その共鳴線がシャープであるためである。つまり、DPPH を用いることで、共鳴周波数 ν_0 を高精度に決定することができる。

[0099] <地磁気の影響の低減>

電流 I を高精度に測定するためには、共振器 120 に印加される磁場が、コイル 110 を流れる電流 I により発生する静磁場 H のみであることが望ましい。したがって、測定部 100 は、地磁気の影響ができるだけ低減されるように構成される。その低減効果について説明する。

[0100] 実施の形態 1 において電流 I により発生する静磁場 H は、上述のように、たとえば約 50 G である。地磁気 H_e は場所によって異なるが、日本における平均値は約 0.46 G とされる。つまり、地磁気 H_e は、静磁場 H よりも 2 桁程度弱い。なお、磁北の日変化は非常に小さく、約 0.1° である。また、地磁気 H_e の大きさに対する地磁気 H_e の日変化の大きさの比率も小さく、0.1%（通常時）から 1%（磁気嵐発生時）までの範囲である。したがって、磁北の日変化、および地磁気 H_e の日変化の大きさのいずれも無視することができる。

[0101] さらに、測定部 100 では、磁気シールド 160 により地磁気 H_e が遮蔽される。磁気シールド 160 の材料としてパーマロイを用いると、地磁気 H_e を 2 桁程度さらに低減することができる。つまり、磁気シールド 160 を設けることにより、地磁気 H_e は、静磁場 H よりも 4 桁程度弱くなる。

[0102] 仮に、静磁場 H が地磁気 H_e に対して水平である場合、地磁気 H_e が静磁場 H に対してベクトル加算（またはベクトル減算）されるため、地磁気 H_e の影響は最も大きくなる。これに対し、実施の形態 1 において、コイル 11

0は、静磁場Hが地磁気H_eに対して略直交するように設けられる。この場合、地磁気H_eと静磁場Hとのベクトル合成により、合成磁場が得られる。静磁場Hに対する合成磁場の増加率は、静磁場Hに対する地磁気H_eの比率（すなわち10のマイナス4乗）の2乗程度（すなわち10のマイナス8乗）と見積もられ、非常に小さい。このように、図8および図9に示すように測定部100を構成することによって、地磁気H_eの影響を大きく低減することができる。

[0103] <電流測定方法>

図10は、実施の形態1に係る電流測定方法を説明するためのフローチャートである。このフローチャートは、所定の条件成立時あるいは所定の期間経過毎にメインルーチンから呼び出されて実行される。なお、このフローチャートの各ステップ（以下、Sと略す）は、基本的にはマイクロコンピュータ300によるソフトウェア処理によって実現されるが、マイクロコンピュータ300内に作製された電子回路を用いたハードウェア処理によって実現されてもよい。

[0104] 図7～図10を参照して、S10において、直流電源10からの電流Iが電流測定装置20を介してNMR装置40へと供給される。電流Iがコイル110を流れることによって静磁場Hが発生し、発生した静磁場Hが共振器120に印加される。

[0105] S20において、制御部310は、発振器210、ゲート230および増幅器240を制御することによって、所望のパルス幅およびパルス強度を持つパルス波を生成させる。生成されたパルス波は、サーキュレータ250を介して共振器120へと供給される。静磁場Hとパルス波の周波数 ν との間に共鳴条件が成立すると、共振器120にて電子スピン共鳴が起こる。電子スピン共鳴による変調を受けた共鳴信号は、共振器120から出力され、サーキュレータ250を介して検波器260へと送られる。

[0106] S30において、信号処理部320は、検波器260により検波された共鳴信号（アナログ信号）のアナログーデジタル変換処理を行なうことにより

共鳴信号（デジタル信号）を得る。さらに、信号処理部320は、時間領域の共鳴信号のフーリエ変換処理を行なうことにより、周波数領域のESRスペクトル（吸収スペクトルまたは分散スペクトル）を取得する（S40）。そして、信号処理部320は、ESRスペクトルから共鳴周波数 ν_0 を算出する（S50）。これらの手法は公知であるため、詳細な説明は繰り返さない。

[0107] S60において、信号処理部320は、算出された共鳴周波数 ν_0 から、標準物質122の共鳴周波数 ν とコイル110を流れる電流 I との対応関係を用いて、コイル110を流れる電流 I_0 を算出する。この算出手法は図5にて詳細に説明したため、説明は繰り返さない。

[0108] なお、マイクロコンピュータ300は、たとえば所定の周期毎にS20～S60の処理を実行して電流 I_0 を算出することにより、直流電源10から供給される電流 I の安定度を算出してもよい。安定度とは、電流 I の大きさに対する電流 I の変動量の比率を意味し、たとえば1ppm（10のマイナス6乗）のように表される。図8および図9にて説明した測定部100の構成を採用することによって、測定部100によれば、サブppm（10のマイナス6乗未満）のオーダーであっても電流 I の安定度を算出することができる。

[0109] 一般的な電流測定手法としては、分岐抵抗を用いる手法、またはホール素子を用いる手法が知られている。分岐抵抗は温度依存性を有するため、分岐抵抗の発熱によりその抵抗値が変化し、電流測定精度が低下する可能性がある。一方、多くのホール素子では、ホール素子に印加される磁場の均一性が低い。また、ホール素子の磁場感度を高めるためには電子の移動度が高いことが要求されるところ、その場合には磁場感度の温度依存性も高くなってしまふ。さらに、ホール素子では磁場が印加されていない状態でもオフセット電圧が存在し、このオフセット電圧も温度依存性を有し得る。以上のような理由により、ホール素子を用いる手法でも、十分な電流測定精度を得ることができない可能性がある。

[0110] 実施の形態 1 に係る電流測定方法によれば、電子スピン共鳴または電子常磁性共鳴の原理を用いることにより、分岐抵抗またはホール素子を用いる手法と比べて、より高精度に電流を測定することができる。

[0111] また、磁気共鳴測定システムにおいて、最終的に高精度の NMR スペクトルが取得できたり、高精細な MRI 画像が取得できたりした場合であっても、それが電流の安定度が高いことが要因となって実現されたものであるのか、あるいは他の要因によるものなのかを切り分けることができない可能性が考えられる。このような要因を特定することは、高精度の NMR スペクトル等を継続的に取得したり、磁気共鳴測定システムの改善を図ったりするために重要である。実施の形態 1 によれば、電流の安定度を高精度に測定することができるので、電流の安定度の寄与の大きさを定量的に評価することが可能になる。

[0112] [実施の形態 2]

実施の形態 1 では測定部 100 にサドルコイルが用いられる例について説明したが、コイルの種類はこれに限定されない。実施の形態 2 においては、ヘルムホルツコイルが用いられる例を説明する。なお、実施の形態 2 に係る電流測定装置 20A において、コイル以外の構成は、実施の形態 1 に係る電流測定装置 20 の対応する構成と同等であるため、説明は繰り返さない。

[0113] 図 11 は、実施の形態 2 におけるコイル構成を説明するための図である。図 11 を参照して、コイル 410 は、ヘルムホルツコイルであり、図中左側に示されるコイル（第 1 の円形コイル）412 と、図中右側に示されるコイル（第 2 の円形コイル）414 とを含んで構成される。コイル 412、414 の各々は、直径 ϕ の円形コイルであり、共通の中心軸 Ax を持つように配置される。また、コイル 412 とコイル 414 との間の距離は、各コイル 412、414 の半径 $\phi/2$ に等しい。ヘルムホルツコイルの構成（巻き方）はサドルコイルの構成よりもシンプルであるため、ヘルムホルツコイルの方が製造しやすい。

[0114] 電流 I が励磁電流としてコイル 410 を流れると、静磁場 H が発生する。

静磁場Hの方向は、コイル412からコイル414へと向かい、かつ、各コイル412, 414の面に略垂直な方向である。コイル412とコイル414とで挟まれた円柱状の空間の中心近傍に共振器120が設けられる。言い換えると、共振器120は、コイル412の中心C1とコイル414の中心C2とから等距離の位置に設けられる。なお、コイル410の巻数が1であり、かつ、コイル410の直径 ϕ が10cmであり、かつ、コイル410を流れる電流Iが300Aである場合、中心の静磁場Hは約50Gである。

[0115] 図12は、実施の形態2に係る電流測定装置の測定部400の構成を説明するための断面図である。図12は図9と対比される。

[0116] 図12を参照して、測定部400は、サドルコイルであるコイル110に代えて、ヘルムホルツコイルであるコイル410が設けられている点において、測定部100（図9参照）と異なる。

[0117] 共振器120およびコイル410は、x軸方向に中心軸を持つ円筒形の筐体に設けられている。この筐体にコイル410を固定することで、コイル410を冷却液150に直接接触するように設置することができる。なお、筐体の材料は試料管130Aの材料と同じであるため、図12に示す断面図では、筐体は試料管130Aと一体的に表される。試料管130Aのz軸方向に延在する中心軸は、共振器120の円筒形筐体のx軸方向に延在する中心軸に直交し、かつ、上記筐体のxy平面上での中心を通る。

[0118] 実施の形態2では、図12に示されるように、試料管130Aの共振器120の近くの位置での直径（図中下部での直径）は、試料管130Aの共振器120から離れた位置での直径（図中上部での直径）よりも細い。これにより試料管130の構造が強固になる利点がある一方で、たとえば図9に示す構造と比べて、試料管130の構造が複雑になる。したがって、試料管130の直径を一定とすることで、試料管130の構造をより単純化することも可能である。なお、測定部400のそれ以外の構成は、測定部100の対応する構成と同等であるため、説明は繰り返さない。

[0119] なお、実施の形態1, 2では、パルスESR法を用いる構成について説明

したが、パルス光を用いることは必須ではない。本開示は、CW-E S R法において電磁波の周波数を掃引する構成にも適用することができる。

[0120] また、実施の形態1, 2では方位磁石106と方位マーク107とを用いて測定部100の方角合わせを行なう構成を説明したが、方位磁石106を設けない構成も可能である。方位磁石106は、ユーザが準備したものを用いてもよい。また、構造は若干複雑になるものの、コイル110またはコイル410に回転機構を設け、共鳴周波数が最も低くなる回転角から地磁気 H_e と静磁場 H との直交条件を求めることもできる。

[0121] 今回開示された実施の形態は、すべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した実施の形態の説明ではなくて請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0122] 1 NMR測定システム、10 直流電源、20, 20A 電流測定装置、30 負荷、40 NMR装置、41 電磁石、42 分光器、43 信号処理装置、100, 400 測定部、101 筐体、101L 下面、101U 上面、102~105 ポート、106 方位磁石、107 方位マーク、110, 410, 412, 414 コイル、112, 114 湾曲部、116, 118 連結部、120 共振器、122 標準物質、130, 130A 試料管、132, 132A, 134, 134A ホルダ、136 クライオポンプ、140 断熱容器、150 冷却液、160 磁気シールド、210 発振器、220 結合器、230 ゲート、240 増幅器、250 サーキュレータ、260 検波器、300 マイクロコンピュータ、310 制御部、320 信号処理部、330 周波数発生部。

請求の範囲

- [請求項1] 直流電源から負荷へと供給される電流を測定するための電流測定装置であって、
- 常磁性を示す標準物質が内部に設けられた共振器と、
- 前記直流電源からの電流が流れることによって磁場を発生し、発生した磁場を前記共振器に印加可能に構成されたコイルと、
- 電磁波を前記共振器に照射可能に構成された光源と、
- 前記コイルにより発生した磁場が前記共振器に印加され、かつ、前記光源からの電磁波が前記共振器に照射された場合に、前記標準物質の電子スピン共鳴または電子常磁性共鳴により前記共振器から出力される電磁波を検出する検出器と、
- 前記検出器からの信号に基づいて、前記標準物質の共鳴周波数を算出する信号処理部とを、前記負荷とは異なる前記電流測定装置の内部に備え、
- 前記信号処理部は、前記検出器からの信号に基づいて算出された共鳴周波数から、前記標準物質の共鳴周波数と前記コイルを流れる電流との対応関係を用いて、前記コイルを流れる電流を算出する、電流測定装置。
- [請求項2] 前記コイルの巻数は、1～3である、請求項1に記載の電流測定装置。
- [請求項3] 前記コイルは、サドルコイルであって、
- 各々が共通の軸周りに湾曲するように形成された第1および第2の湾曲部と、
- 各々が、前記軸の延在方向に沿って延び、前記第1の湾曲部と前記第2の湾曲部とを連結するように形成された第1および第2の連結部とを含み、
- 前記第1および第2の連結部は、前記軸に関して互いに対向するように配置され、

前記共振器は、前記軸上に設けられる、請求項 1 または 2 に記載の電流測定装置。

[請求項4] 前記コイルは、略同一形状を有する第 1 および第 2 の円形コイルが共通の中心軸を持つように配置されたヘルムホルツコイルであり、

前記共振器は、前記第 1 および第 2 の円形コイルの各々の中心から等距離の位置に設けられる、請求項 1 または 2 に記載の電流測定装置。

[請求項5] 前記コイルは、前記共振器に印加される磁場が地磁気に対して略直交する方向になるように設けられる、請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の電流測定装置。

[請求項6] 前記コイルを覆い、地磁気を遮蔽する磁気シールドをさらに備える、請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載の電流測定装置。

[請求項7] 前記コイルは、高温超電導材料により形成され、
前記電流測定装置は、前記コイルを冷却するための冷却液を保持可能に構成された断熱容器をさらに備える、請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載の電流測定装置。

[請求項8] 前記断熱容器の内部に設けられ、自身の温度が低下するに従って気体の捕捉量が増加するクライオポンプをさらに備える、請求項 7 に記載の電流測定装置。

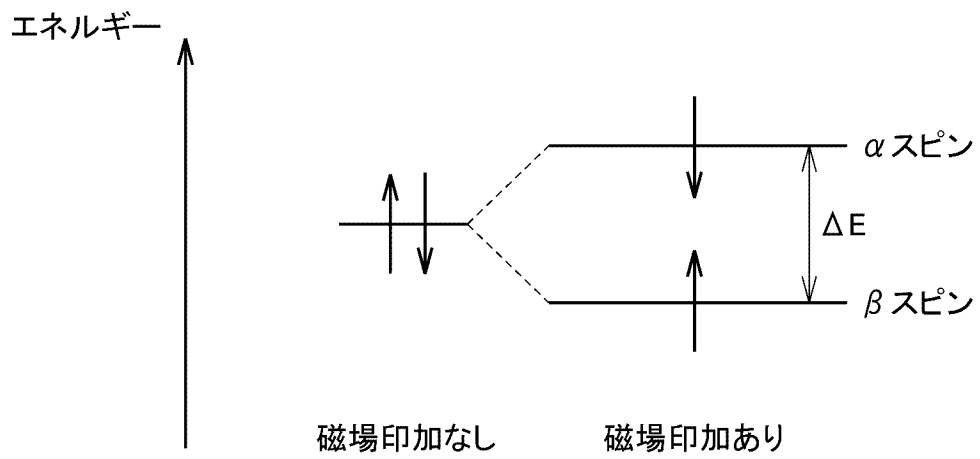
[請求項9] 前記標準物質は、D P P H (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) である、請求項 1 ～ 8 のいずれか 1 項に記載の電流測定装置。

[請求項10] 前記直流電源と、
請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の電流測定装置と、
磁気共鳴装置とを備え、
前記磁気共鳴装置は、前記直流電源から供給される電流を用いて、試料に印加するための磁場を発生する他のコイルを前記負荷として含む、磁気共鳴測定システム。

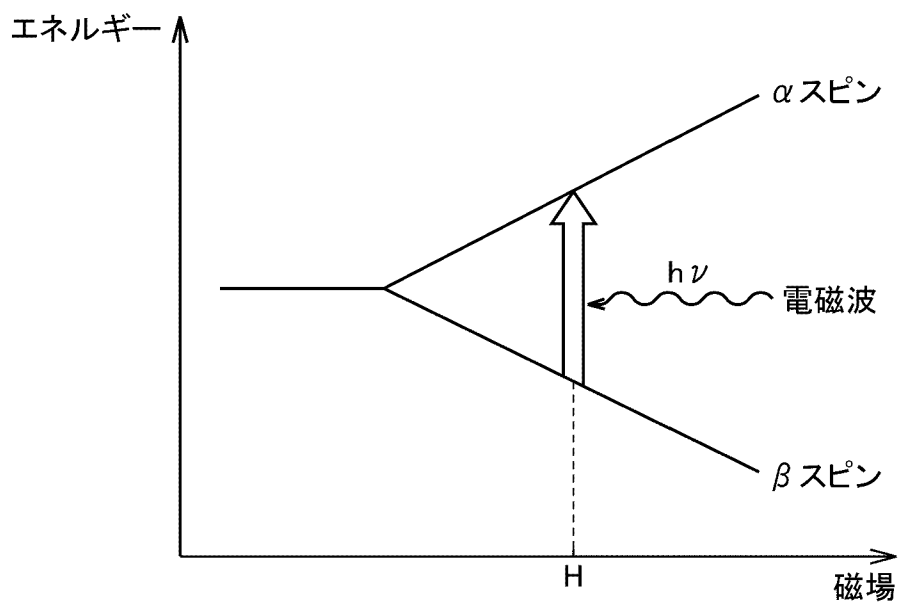
[図1]

FIG.1

(a)



(b)



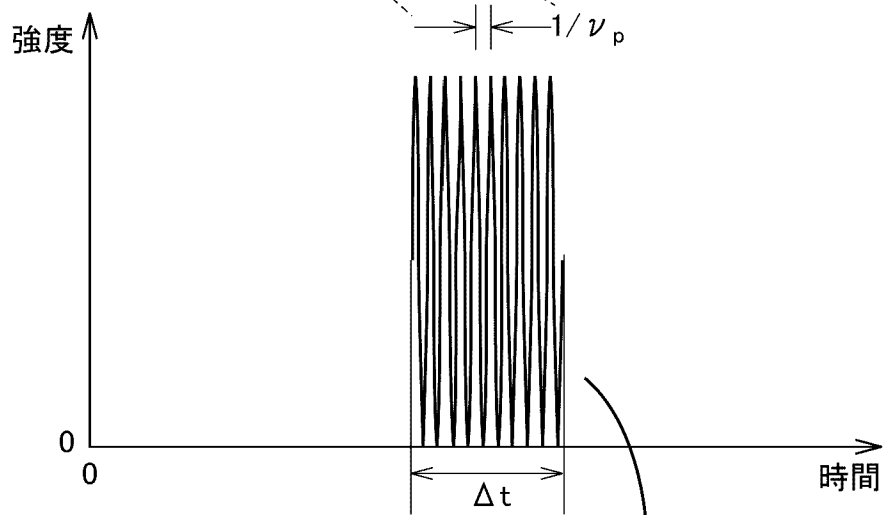
[図2]

FIG.2

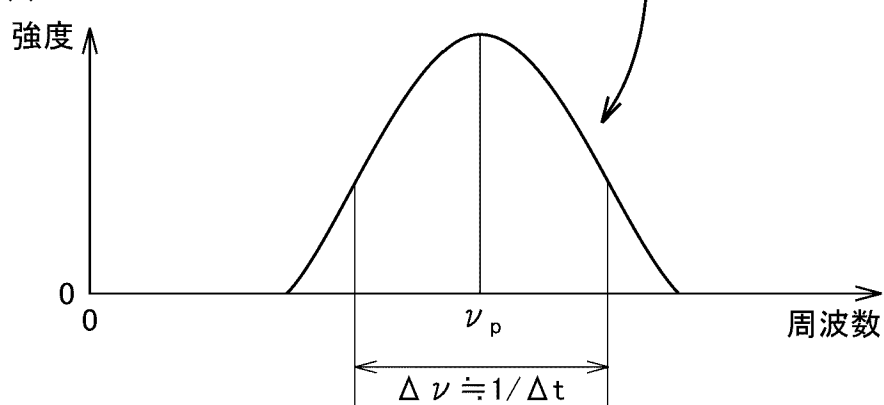
(a)



(b)

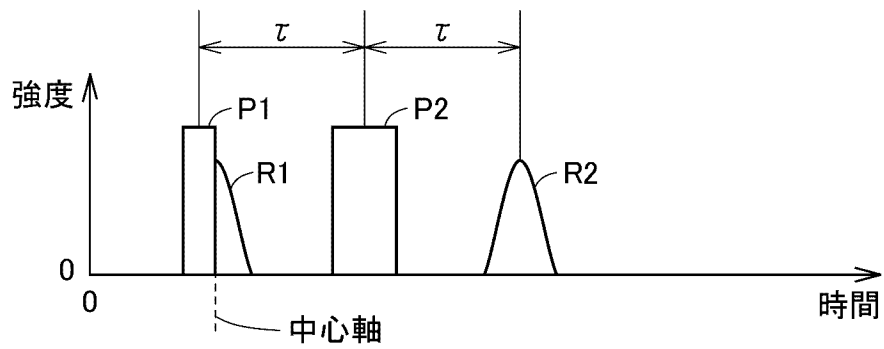


(c)



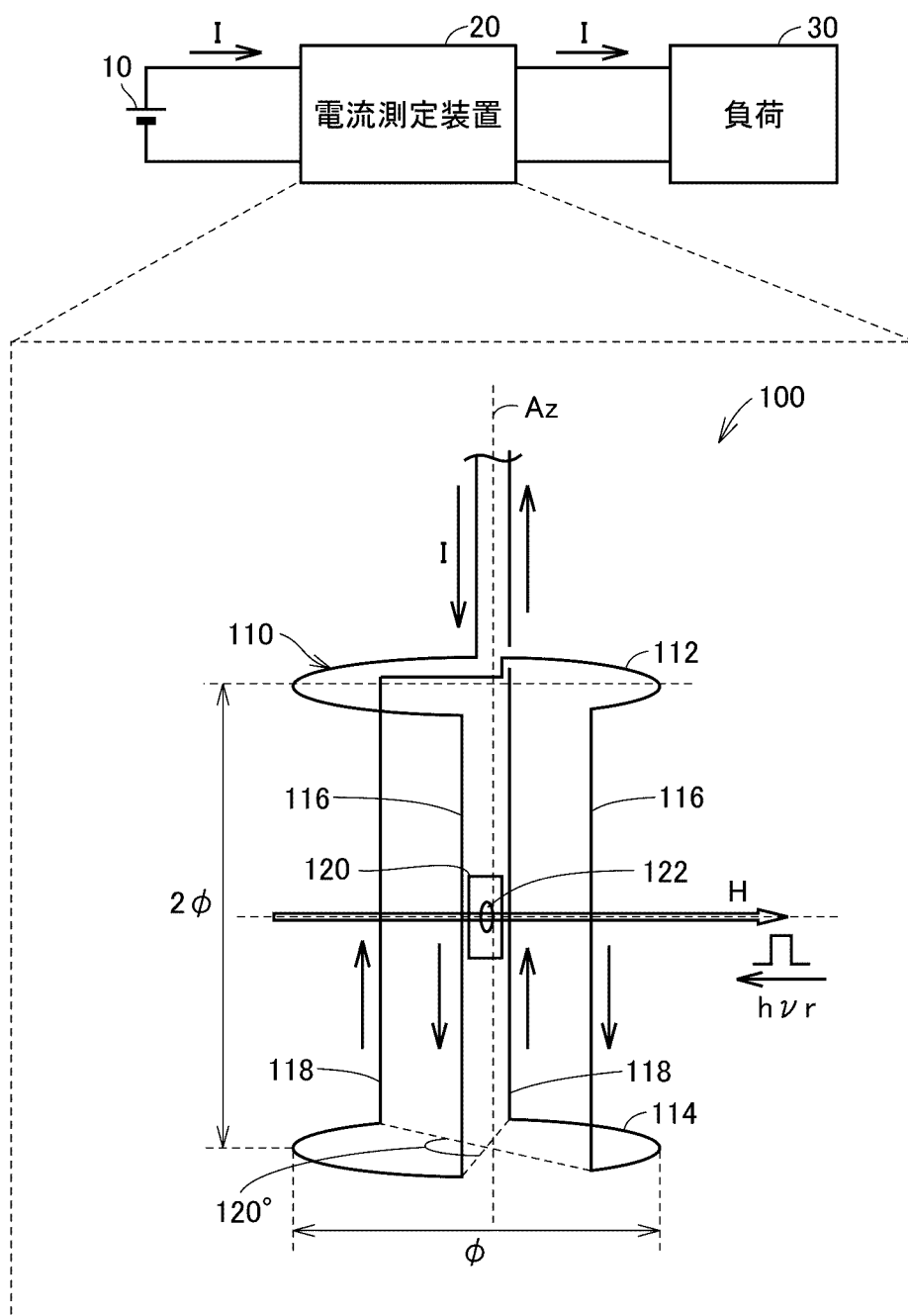
[図3]

FIG.3



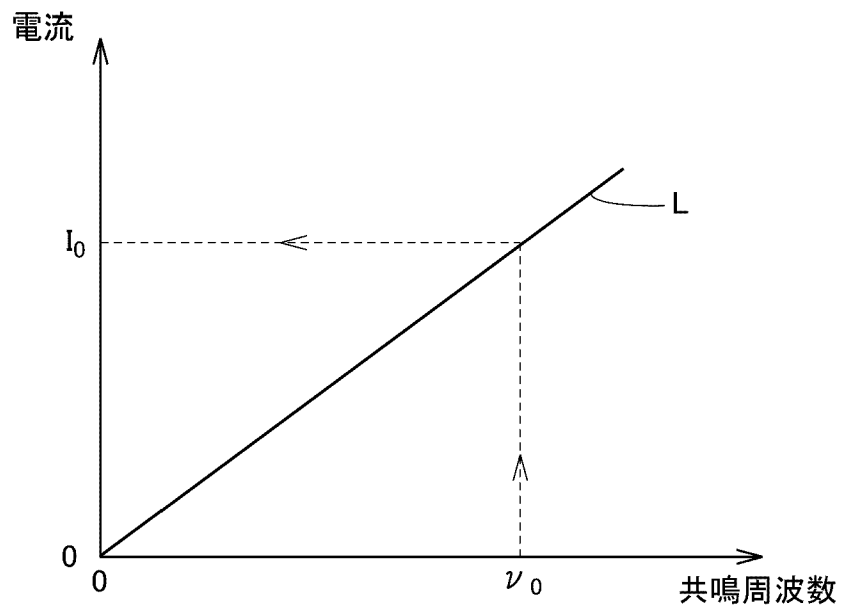
[図4]

FIG.4



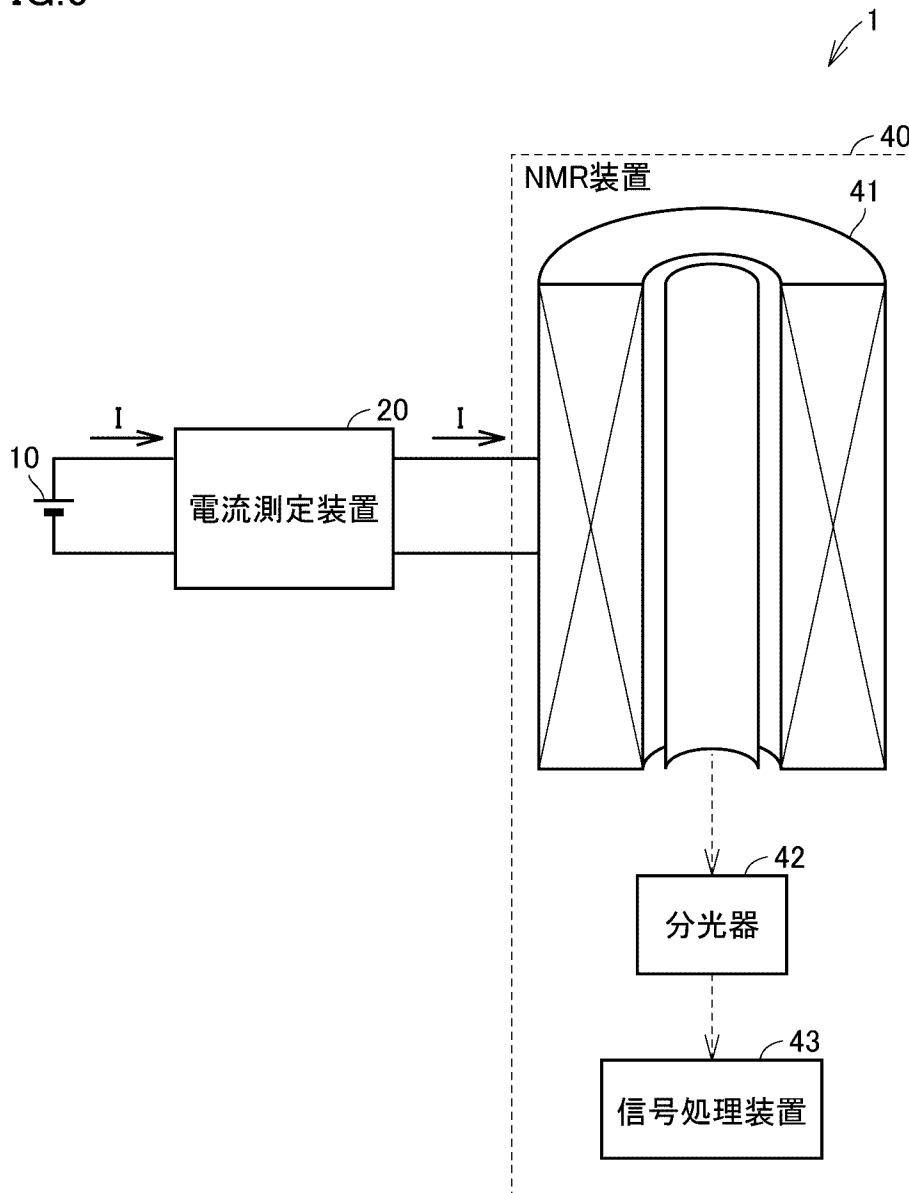
[図5]

FIG.5



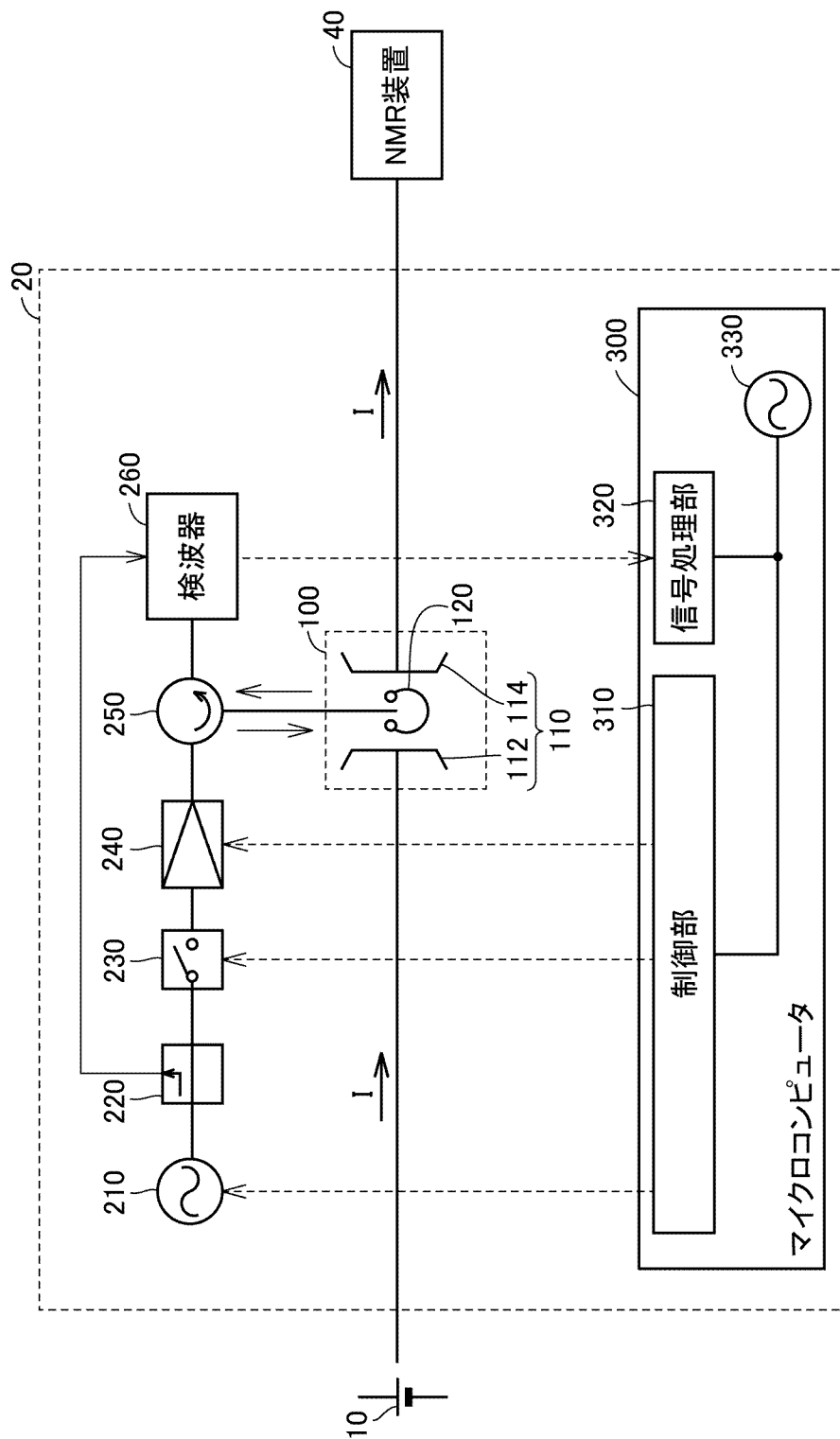
[図6]

FIG.6



[図7]

FIG.7



[図8]

FIG.8

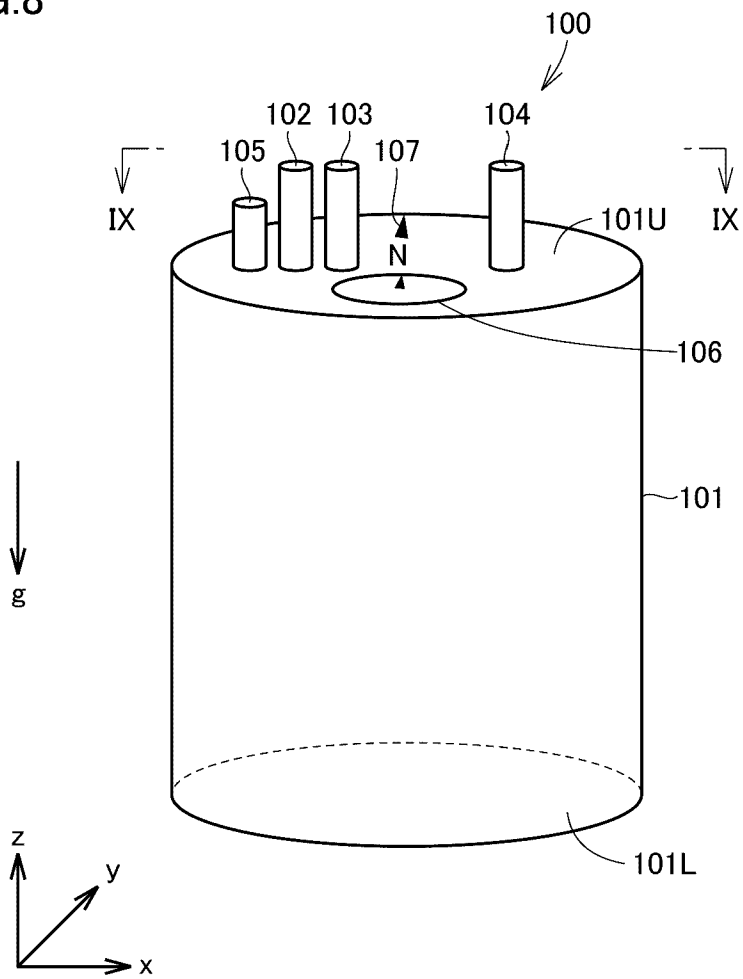
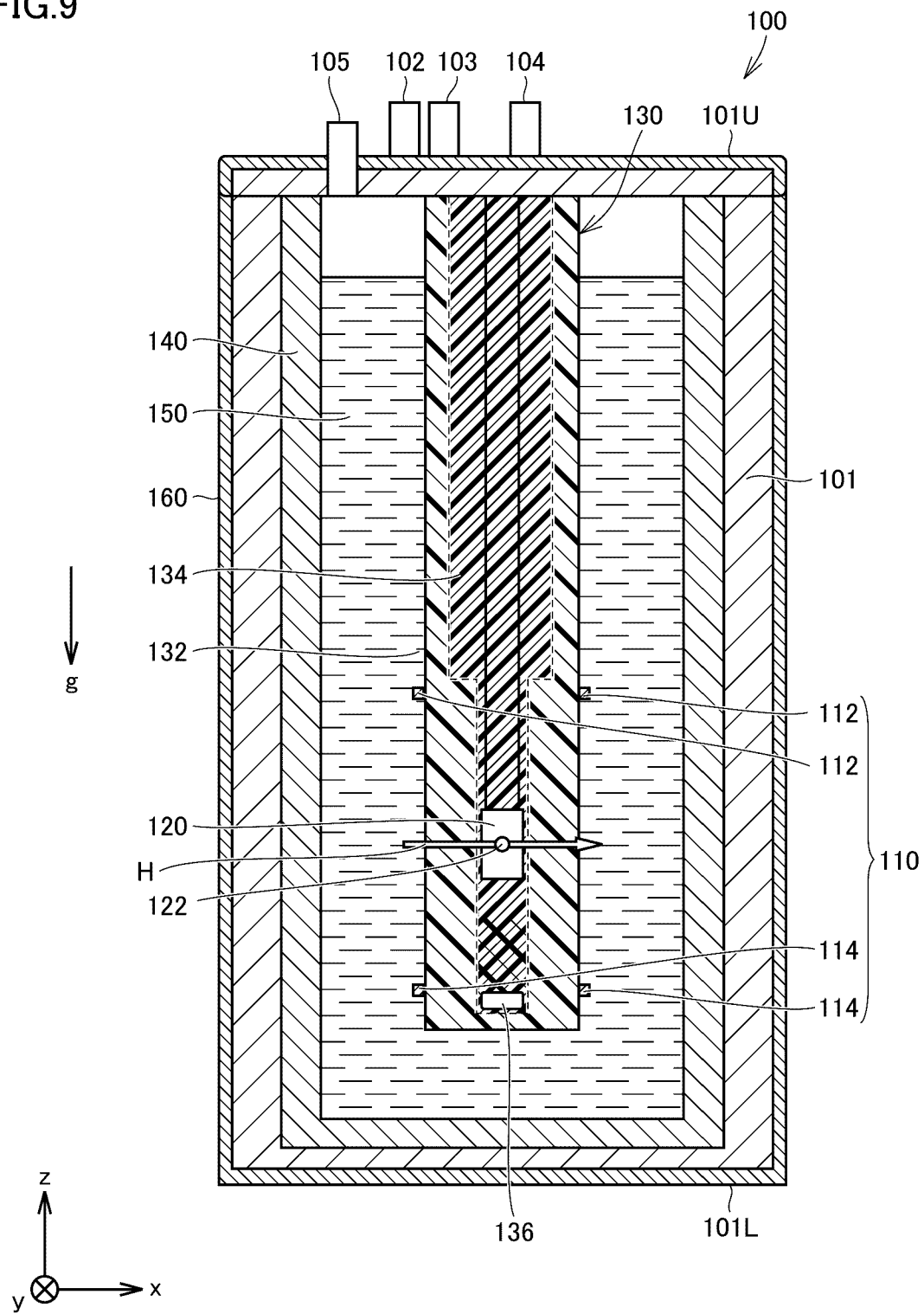


FIG.9



[図10]

FIG.10

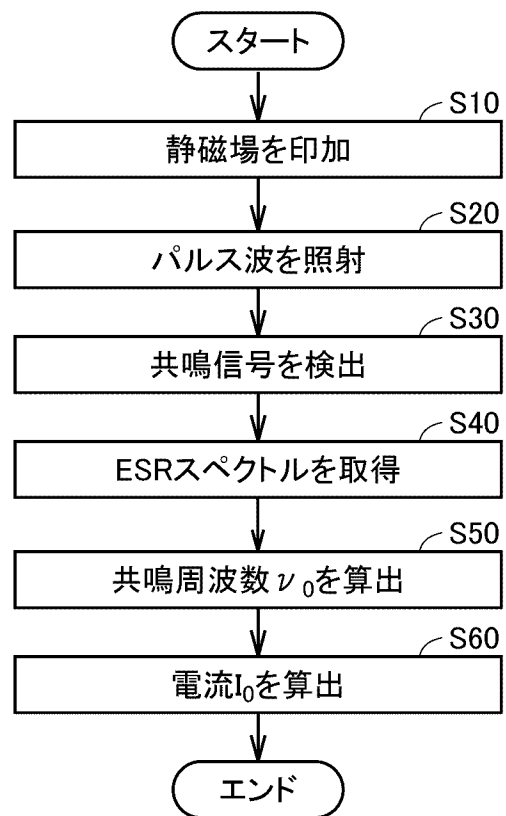
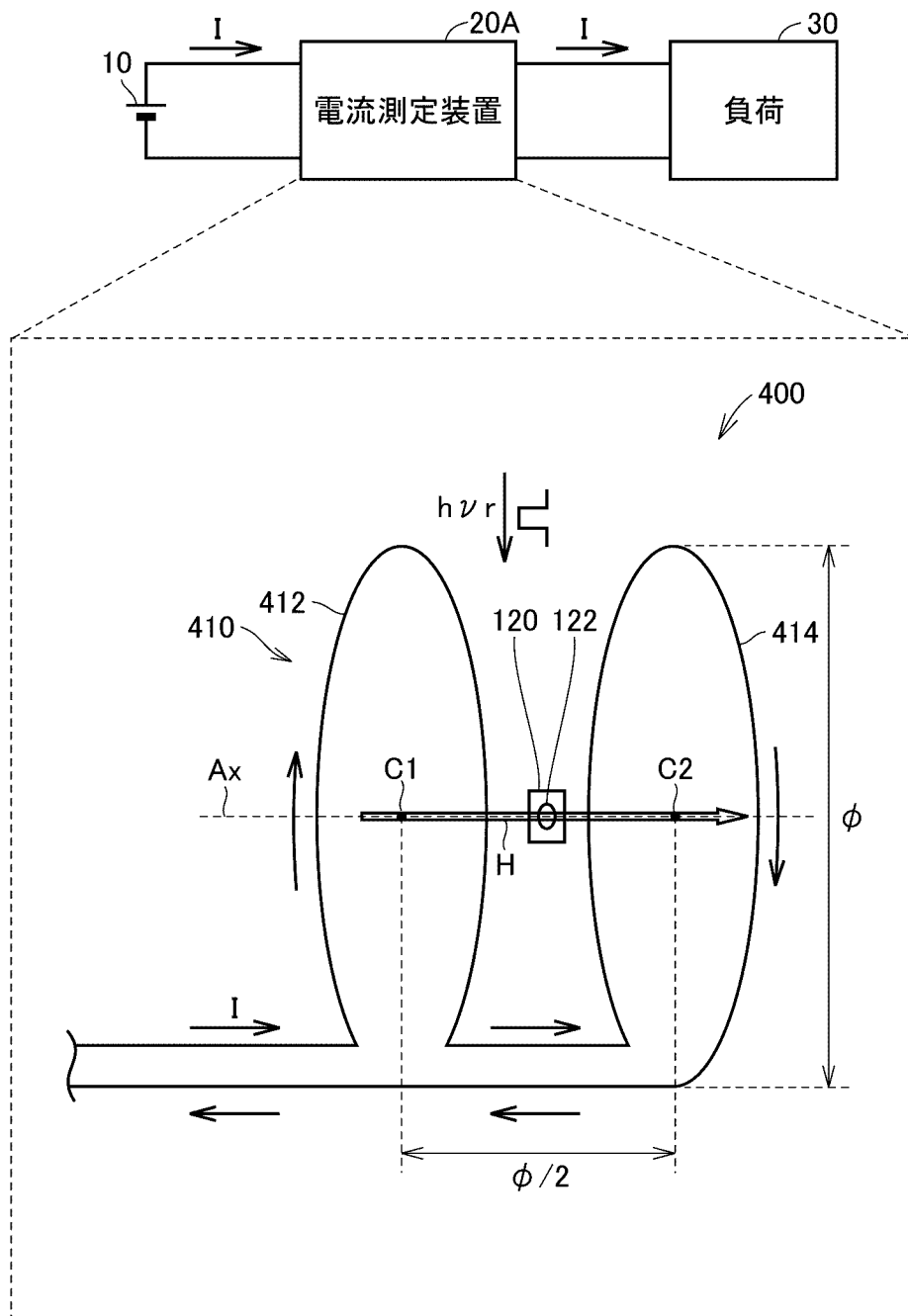
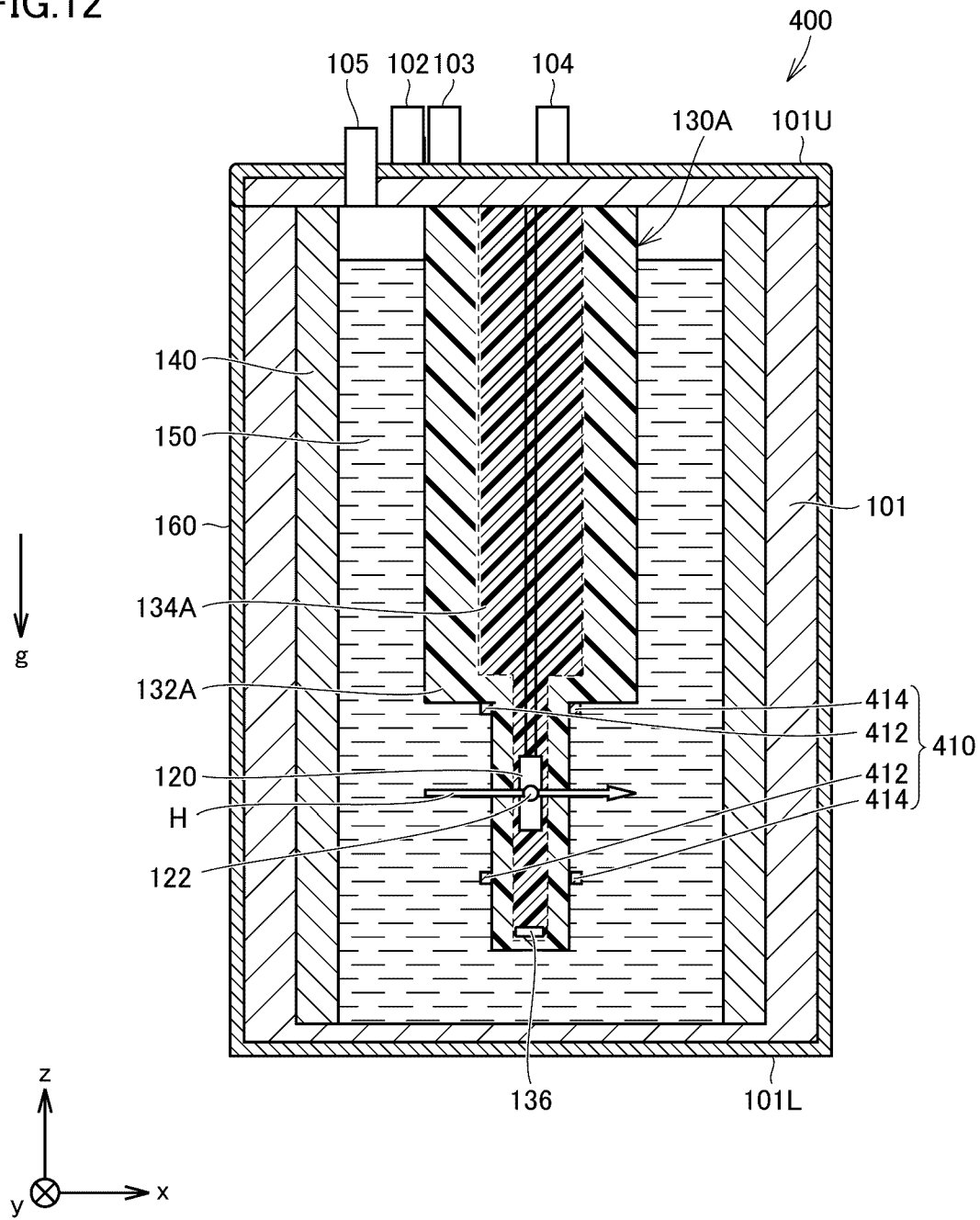


FIG.11



[図12]

FIG.12



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/074977

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R15/24(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R15/24, G01R33/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2013-057527 A (JEOL RESONANCE Inc.), 28 March 2013 (28.03.2013), paragraphs [0002] to [0006]; fig. 3 (Family: none)	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 05-196652 A (Commissariat A L'energie Atomique), 06 August 1993 (06.08.1993), paragraphs [0034] to [0048]; fig. 1 to 4 & US 5296802 A column 5, line 52 to column 7, line 2; fig. 1 to 4 & EP 519804 A1 & FR 2678069 A	1-6, 9-10 7-8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
10 November 2016 (10.11.16)

Date of mailing of the international search report
22 November 2016 (22.11.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/074977

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 47-020265 B1 (Mitsubishi Electric Corp.), 08 June 1972 (08.06.1972), column 1, lines 22 to 24; column 3, lines 23 to 25 (Family: none)	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 48-005997 B1 (Mitsubishi Electric Corp.), 21 February 1973 (21.02.1973), column 4, lines 17 to 21 (Family: none)	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 2001-264401 A (Yamagata Public Corporation for the Development of Industry), 26 September 2001 (26.09.2001), paragraphs [0009], [0015] (Family: none)	1-6, 9-10 7-8
Y	JP 2009-193708 A (Tokai Rika Co., Ltd.), 27 August 2009 (27.08.2009), paragraphs [0017], [0034]; fig. 6 (Family: none)	5-6
A	Microfilm of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 062656/1980 (Laid-open No. 164170/1981) (Hitachi, Ltd.), 05 December 1981 (05.12.1981), specification, page 3, lines 5 to 11; page 4, lines 15 to 18; fig. 2 (Family: none)	7-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01R15/24(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01R15/24, G01R33/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2013-057527 A (株式会社 JEOL RESONANCE) 2013.03.28, 段落 0002-0006, 図 3 (ファミリーなし)	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 05-196652 A (コミツサリア タ レネルジー アトミック) 1993.08.06, 段落 0034-0048, 図 1-4 & US 5296802 A, 第 5 欄第 52 行-第 7 欄第 2 行, 図 1-4 & EP 519804 A1 & FR 2678069 A	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 47-020265 B1 (三菱電機株式会社) 1972.06.08, 第 1 欄第 22-24 行, 第 3 欄第 23-25 行 (ファミリーなし)	1-6, 9-10 7-8

C 欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

10.11.2016

国際調査報告の発送日

22.11.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

荒井 誠

2 S

3 2 0 3

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

C (続き) . 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 48-005997 B1 (三菱電機株式会社) 1973. 02. 21, 第 4 欄第 17-21 行 (ファミリーなし)	1-6, 9-10 7-8
Y A	JP 2001-264401 A (財団法人山形県企業振興公社) 2001. 09. 26, 段落 0009, 0015 (ファミリーなし)	1-6, 9-10 7-8
Y	JP 2009-193708 A (株式会社東海理化電機製作所) 2009. 08. 27, 段落 0017, 0034, 図 6 (ファミリーなし)	5-6
A	日本国実用新案登録出願 55-062656 号 (日本国実用新案登録出願公開 56-164170 号) の願書に添付した明細書及び図面の内容を撮影したマイクロフィルム (株式会社日立製作所) 1981. 12. 05, 明細書第 3 頁第 5-11 行, 第 4 頁第 15-18 行, 図 2 (ファミリーなし)	7-8